Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 97 (1979)
Heft: 45

Artikel: Zum Wärmehaushalt von Freiluftschwimmbädern
Autor: Trepp, Christian
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-85576

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Zum Wärmehaushalt von Freiluftschwimmbädern

Von Christian Trepp, Zürich

Freiluftschwimmbäder stehen in einem dauernden Wärmeaustausch (und Stoffaustausch) mit ihrer Umgebung, und die Wassertemperatur strebt laufend dem jeweiligen Gleichgewichtszustand mit dieser Umgebung zu. Im *Schweizerischen Mittelland* liegt diese Gleichgewichtstemperatur nur während kurzer Perioden im Jahr wesentlich über 20°C. In diesem Beitrag werden die Wärmeverluste bzw. -gewinne eines offenen und eines abgedeckten Schwimmbades berechnet und die Berechnungen werden zum Schluss mit einigen ausgeführten Messungen verglichen. Für die Berechnung wählen wir einen Aufstellungsort im Schweizerischen Mittelland (47° nördlicher Breite, 7° 30′ östlicher Länge). Der Anschaulichkeit halber, d. h. um einen guten Begriff der vorkommenden Wärmeleistungen zu geben, wählen wir eine Anlage bestimmter Grösse, und zwar ein verhältnismässig kleines Objekt mit einem Wasservolumen von 50 m³ und einer Oberfläche von 36 m² (4×9 m).

Wärmeverluste

Für unsere Berechnungen nehmen wir jeweils *stationäre Verhältnisse* an. Die *Wärmeverluste* setzen sich aus folgenden, durch verschiedene Mechanismen bewirkte Anteile zusammen:

- Wärmeabgabe ans Erdreich (durch Wärmeleitung)
- Wärmeabgabe von der Wasseroberfläche an die Luft (durch Konvektion und Verdunstung)
- Wärmeabstrahlung gegen den Weltraum.

Der *Wärmegewinn* stammt einzig und allein von der direkten Sonneneinstrahlung.

Wärmeabgabe ans Erdreich

Für die in Bild 1 angegebene Konstruktion erhalten wir bei angenommener Bodentemperatur T_b = 10°C und bei einer Wassertemperatur von 25°C unter Verwendung der in Bild 1 angegebenen Stoffwerte als Wärmeverluste durch die Seitenwände 216 W, durch den Boden 704 W, also insgesamt einen Wärmeleitungsverlust von 920 W.

Je nach Witterungsverhältnissen sind die Wärmeverluste an der Oberfläche eines offenen Bades beträchtlich grösser als die durch Leitung an die Umgebung, denn insbesondere zufolge der Verdunstung von Wasser in relativ trokkene Luft hinein kühlt sich das Wasser recht stark ab, weil von dem verbleibenden Wasser die grosse Verdampfungswärme aufgebracht werden muss.

Wärmeübertragung an der Wasseroberfläche

Für unsere einfache Rechnung betrachten wir die *Badoberfläche als eine längsangeströmte Platte*. Unter der Annahme von Turbulenzbeginn am Plattenrand, d. h. bei x = 0, gilt für die örtliche *Nusseltzahl* für Luft

$$(1)\quad Nu_x = 0{,}0230\, Re_x^{0,8}$$

$$Re = \frac{w \cdot x}{\nu} \qquad Nu = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda}$$

Aus dieser Gleichung können wir bei bekannten Stoffdaten von Luft für verschiedene Windgeschwindigkeiten w, abhängig vom Ort x, die Wärmeübergangszahlen α berechnen. Im System Wasserdampf-Luft gestattet die recht einfache *Lewis-Beziehung*, aus der Wärmeübergangszahl α einfach die auf die Wasserdampfbeladung X bezogene Stoffübergangszahl β_x zu berechnen.

$$(2)\quad \frac{\beta_X \cdot c_p}{\alpha} = 1 \quad \text{(Lewis Beziehung)}$$

Für die örtliche Wärmeübergangszahl α_x gilt:

$$(3)\quad \alpha_x = \frac{\lambda}{x} \cdot Nu_x$$

und für die örtliche Stoffübergangszahl β_X:

$$(4)\quad \beta_X = \frac{\lambda}{x \cdot c_p} \cdot Nu_x$$

Für die numerische Auswertung finden folgende Stoffdaten Verwendung:

Stoffdaten für Luft und Wasser bei 20°C

Luft: λ = 0,026 W/mK

c_p = 1007 J/kg K

ν = 15·10⁻⁶ m²/s

Wasser: Verdampfungswärme

Δh_v = 2442 kJ/kg

Die pro Flächeneinheit durch Konvektion abgeführte Wärme beträgt

$$(5)\quad q_{\alpha,x} = \alpha_x \cdot (T_w - T_u)$$

Ist die Umgebungstemperatur höher als die Wassertemperatur, so führt der konvektive Wärmeübergang zu einer Beheizung der Wasseroberfläche. Die beim Verdunsten (Stoffübergang) abgeführte Wärme beträgt (ebenfalls pro Flächeneinheit)

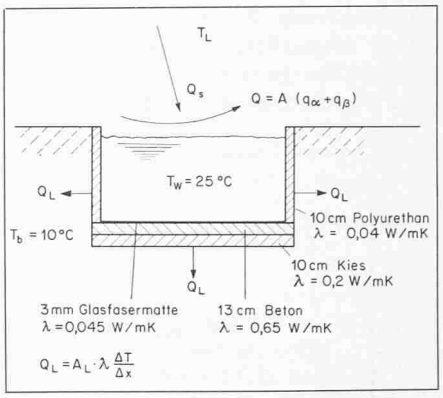


Bild 1. Schematische Darstellung der Wärmeströme, Dimensionen und Zahlenwerte

$$(6)\quad q_{\beta,x} = \beta_x \cdot (X_s - X_u) \cdot \Delta h_{v_{Wasser}}$$

Dieser Mechanismus führt immer zu einer Abkühlung des Wassers, so lange die Beladung der Umgebungsluft mit Feuchtigkeit geringer ist, als die Sättigungsfeuchtigkeit bei der Wassertemperatur.

Insgesamt beträgt der *Wärmeverlust*

$$(7)\quad q_x = q_{\alpha,x} + q_{\beta,x}$$

In einem Zahlenbeispiel ergeben sich folgende Wärmeverluste pro Flächeneinheit (W/m²):

Umgebungstemperatur
T_u = 25°C

Wassertemperatur
T_w = 20°C

Umgebungsfeuchtigkeit
X_u = 9×10⁻³ kg/kg Mittelwert von Zürich bei 25°C

Sättigungsfeuchtigkeit bei 20°C
X_s = 14,8×10⁻³ kg/kg

Windgeschwindigkeit w = 3m/s

Angströmlänge x (m)	$q_{\alpha,x}$	$q_{\beta,x}$	q_x
1	-52,1	+146,4	+94,3
3	-45,3	+127,4	+82,2
6	-36,4	+102,3	+65,9
9	-33,5	+ 94,4	+60,9

Wärmeverluste in W/m², abhängig von der Angströmlänge x für obige Umgebungsbedingungen

Für die Gleichung (1) können wir auch eine integrale Form finden. Sie lautet:

$$(8)\quad \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} Nu_x \, dx = Nu_L\, 0{,}0288\, Re_L^{0,8}$$

Die Gleichung (8) zusammen mit den vorher abgeleiteten Beziehungen für den Stoffübergang wurden für verschiedene Verhältnisse ausgewertet und sie sind in Bild 2 für eine Wassertemperatur von 25° C und mittleren Verhältnissen der Luftfeuchtigkeit aufgetragen. Demnach treten also bei diesen Wassertemperaturen auch bei recht hoher Lufttemperatur immer noch Wärmeverluste in der Grössenordnung von 0–10 kW auf. Der Hauptanteil davon geht auf Konto der Verdunstung. Um die Wärmeverluste an der Oberfläche zu verringern, ist es nicht unüblich, die Wasseroberfläche zu bedecken, z. B. mit Folien oder auch mit Rolladen. Vom Standpunkt der Sicherheit her sind wegen ihrer recht grossen Tragkraft Rolladen zu bevorzugen, wobei diese so ausgeführt werden können, dass – mit dem Wasser als tragendem Element – sie auf der Oberfläche schwimmen. Von den Strahlungseigenschaften her sehr günstig wäre z. B. eine *Doppelverglasung*. Mit dieser liesse sich der bekannte *Treibhauseffekt* erzielen, weil das Glas für die vom Bad ausgehende langwellige Wärmestrahlung fast undurchlässig ist, hingegen das vorwiegend kurzwellige Sonnenlicht ins Wasser eintreten lässt, wo es praktisch vollständig absorbiert wird.

Auf der Suche nach einem günstigen Kompromiss zwischen Sicherheit, Strahlungsdurchlässigkeit und Herstellmöglichkeiten bieten sich *Rolladen aus Kunststoff*, z. B. *Hart-PVC* an. Aus diesem Material lassen sich u. a. auch *Hohlprofile* pressen, womit sich angenähert eine «Doppelverglasung» in Form eines Rolladens herstellen lässt (Bild 3). Ein typisches Transmissionsspektrum von einem für solche Rolladen geeigneten Material ist dargestellt in Bild 7. Wird die ganze Wasseroberfläche von einem solchen Rolladen bedeckt, dann reduziert sich die an die Umgebung abgegebene Wärmemenge beträchtlich, denn nun ist nur noch die Wärmeleitung im Hohlprofil (Luft) zu berücksichtigen.

Für ΔT von 10 K ergibt sich bei einem Luftspalt von 8 mm

$$Q^* = 0{,}024 \cdot 36 \cdot \frac{10}{8 \cdot 10^{-3}} = 1 \text{ kW}$$

Zu diesem Wert ist noch ein Zuschlag zu machen, da die Oberfläche nicht ganz abgeschlossen ist. Auf diesen Punkt kommen wir später bei der Besprechung der Messwerte nochmals zurück.

Im folgenden wird das Vorgehen bei der Berechnung der an einem klaren Tag von der Sonne im Mittelland (die Daten beziehen sich auf Bern) in ein Schwimmbad durch die Abdeckung eingestrahlten und absorbierten Energie E behandelt. Diese Rechnung berücksichtig nur die Einstrahlung, auf die nächtliche Abstrahlung kommen wir dann später noch zu sprechen.

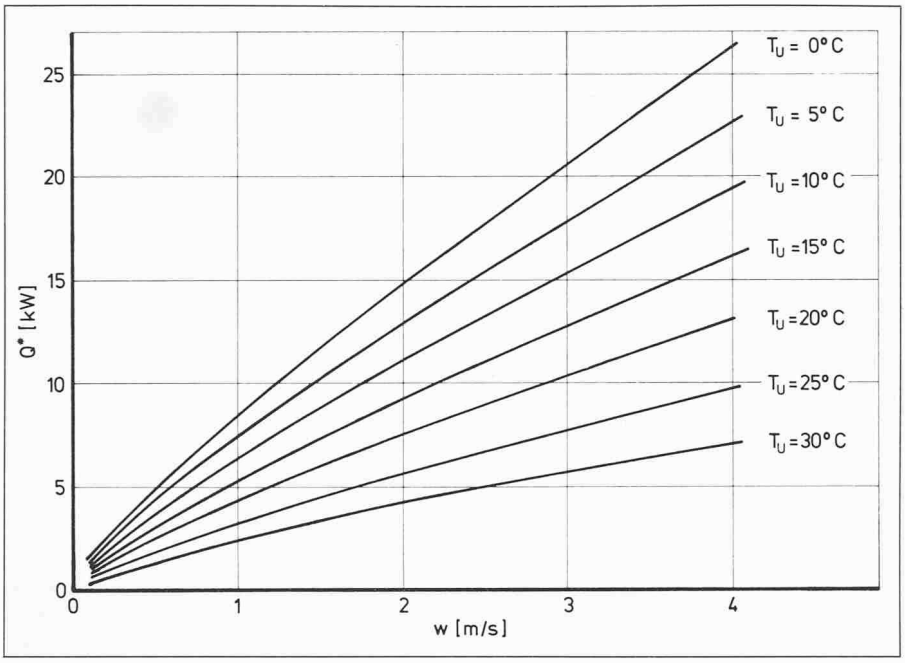


Bild 2. Wärmeverluste der Wasseroberfläche (36 m²), abhängig von Umgebungstemperatur T_u und Windgeschwindigkeit w. Wassertemperatur: 25°C

Berechnung der Energiestromdichte der Strahlung

Mit guter Näherung kann man die Sonne als schwarzen Strahler von 6000 K betrachten, der unter einem Raumwinkel $\beta = 6{,}8 \cdot 10^{-5}$ auf die Erde strahlt.

Nach der Plank'schen Strahlungsformel gilt somit für die Energiestromdichte $I_S(\lambda)$

$$(9) \quad I_S(\lambda)\, d\lambda = \beta \cdot \frac{2h\, c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}\right) - 1}\, d\lambda$$

$I_S(\lambda)$ ist in Bild 4 dargestellt.

Einen Teil dieser Strahlung absorbiert die Erdatmosphäre. Je nach Einfallswinkel der Sonne ändert sich aber die durchstrahlte Luftschichtdicke und damit der Transmissionskoeffizient Θ der Atmosphäre.

Es gilt

$$\Theta(\lambda, \alpha) = \Theta^{1/\sin}(\lambda, 90°)$$

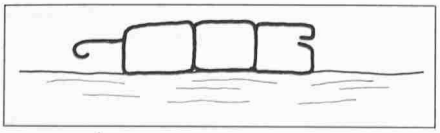


Bild 3. Beispiel des Hohlprofils für eine Abdeckung (auf der Wasseroberfläche schwimmend)

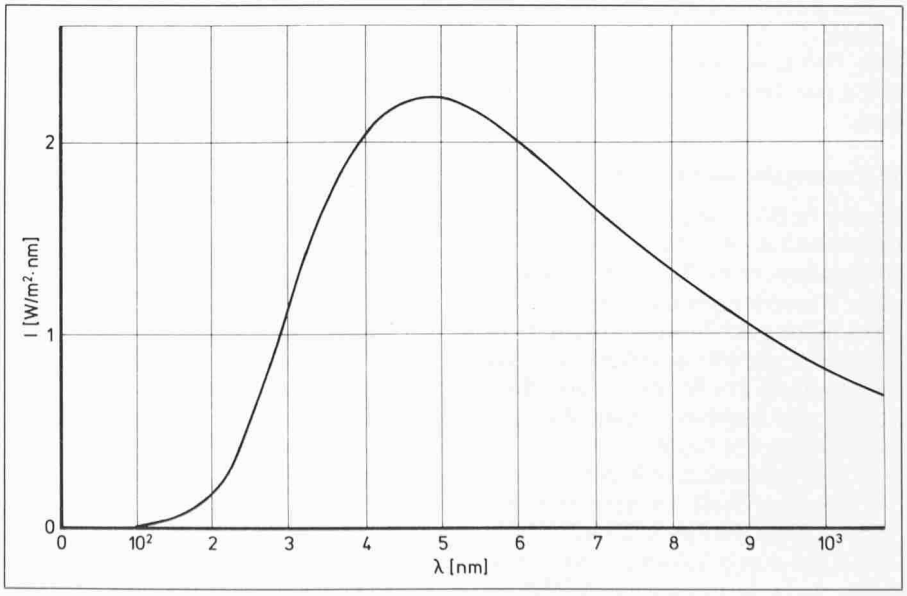


Bild 4. Strahlung bei 6000 K (Sonne) und einem Raumwinkel von $6{,}8 \times 10^{-5}$ [nach Glg. (9)]

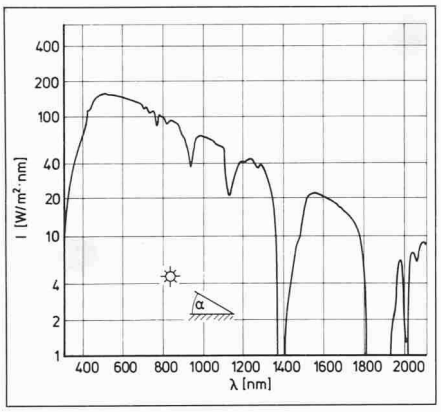


Bild 5. Transmissionskoeffizient der Atmosphäre

Die Werte für Θ (90°) sind einem Diagramm von *E.G. Laue:* («The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations». Solar Energy Vol. 13(1970, p. 43–57) entnommen (vgl. Bild 5). Da die Strahlung eine gerichtete Grösse ist, bestimmt auch noch der Einfallwinkel auf die bestrahlte Fläche die Grösse der auf sie eingestrahlten Energiestromdichte. Damit ergibt sich für eine horizontale Fläche mit der obigen Definition von α die Strahlungsenergiestromdichte I_o

(10)

$$I_o(\alpha,\lambda) = I_A(\lambda) \cdot \Theta^{1/\sin\alpha} \cdot \sin\alpha$$

statt cos (90-α)

vgl. Bild 6.

Es zeigt sich ferner, dass sich die numerische Berechnung der gesamten Energiestromdichte

$$\int_0^\infty I_i(\lambda,\alpha)\, d\lambda$$

im Rahmen der hier möglichen Genauigkeit vereinfacht bestimmen lässt mit

(11)

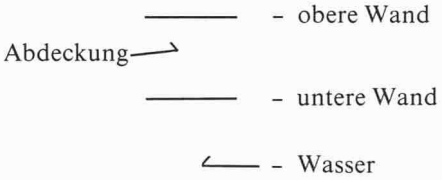
$$\int_0^\infty I_o(\lambda,\alpha)\, d\lambda = \phi\, I_o(5000\ \text{Å},\alpha)$$

Berechnung der absorbierten Strahlung

Annahmen

Die Berechnung der Strahlungsabsorption im Schwimmbad basiert auf den Annahmen:

- dass bei der Abdeckung nur der von der unteren Wand absorbierte Strahlungsanteil der Energieaufnahme des Wassers hinzuzurechnen ist;



- dass die (abgeschwächte) Strahlung unabhängig vom Einfallswinkel nach Durchlaufen einer 4 m dicken Wasserschicht durch die Abdeckung wieder austritt;
- dass die Absorption am Boden und den Seitenwänden zu vernachlässigen ist.

Transmissionskoeffizienten von Abdekkung und Wasser

Für den Transmissionskoeffizienten Θ_W *einer* Abdeckungswand liegen für senkrechten Einfall Messwerte vor (vgl. Bild 7).

Für den schrägen Einfall ist angenommen

$$\Theta_W(\alpha) = \Theta_W^{1/\sin\alpha}$$

Da der Brechungsindex $n(\lambda)$ der Wand nicht bekannt ist, ist der ungünstigste Fall n = 1 angenommen (λ: Wellenlänge). Im Transmissionskoeffizienten Θ_W ist auch der Verlust durch Reflexion enthalten. Dieser ist aber bei nicht diffuser Reflexion ebenfalls vom Einfallswinkel abhängig (Fresnelsche Gleichungen). Das wurde nicht berücksichtigt, da $n(\lambda)$ und die Struktur der Oberfläche unbekannt sind, sondern es wurde angenommen, die Reflexion sei diffus und damit der reflektierte Anteil unabhängig vom Einfallswinkel. Der so berechnete Transmissionskoeffizient wird also nur als Funktion der Materialstärke betrachtet. Den Transmissionskoeffizienten von Wasser gibt Bild 7 wieder (nach Landolt-Börnstein).

Resultate

Unter diesen Voraussetzungen und Annahmen gilt für die Strahlungsintensität I_A, die von der unteren Wand der Abdeckung (auf dem Hin- *und* Rückweg) und von einer 4 m dicken Wasserschicht absorbiert wird, nachdem die Sonnenstrahlung die Erdatmosphäre und die obere Wand der Abdeckung durchlaufen hat:

(12)

$$I_A(\lambda,\alpha)\left[\frac{W}{m^2 \cdot 10\text{Å}}\right] = I_o(\lambda,\alpha)\,\Theta_{Wand}^{1/\sin\alpha} \cdot \left(1-\Theta_{Wasser}\left(\Theta_{Wand}^{1/\sin\alpha}\right)\right)$$

Einige so berechnete Werte zeigt Bild 8.

Entsprechend wie bei Gleichung (11) gilt für die Integration über die Wellenlängen [d. h. für die im gesamten Sonnenspektrum absorbierte Strahlung $I_A(\alpha)$] ungefähr:

$$\int_0^\infty I_A(\lambda,\alpha)\, d\lambda \simeq \phi\, I_A(6000\ \text{Å},\alpha)$$

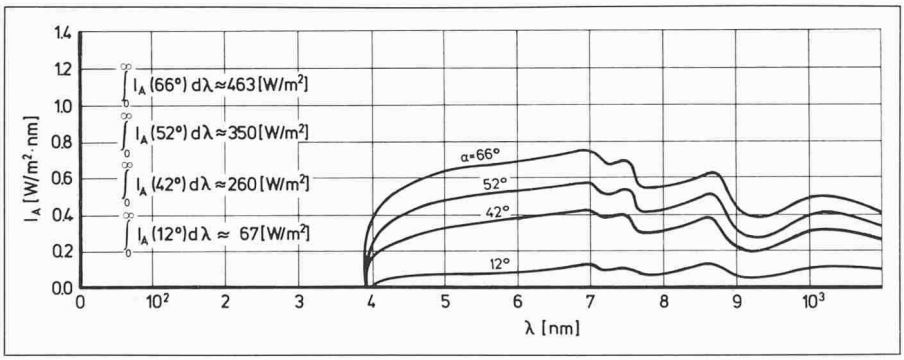


Bild 6. Strahlungsintensität der Sonne in Abhängigkeit von Einfallswinkel α. (Längerer Weg durch die Atmosphäre und nicht senkrechter Einfall berücksichtigt.)

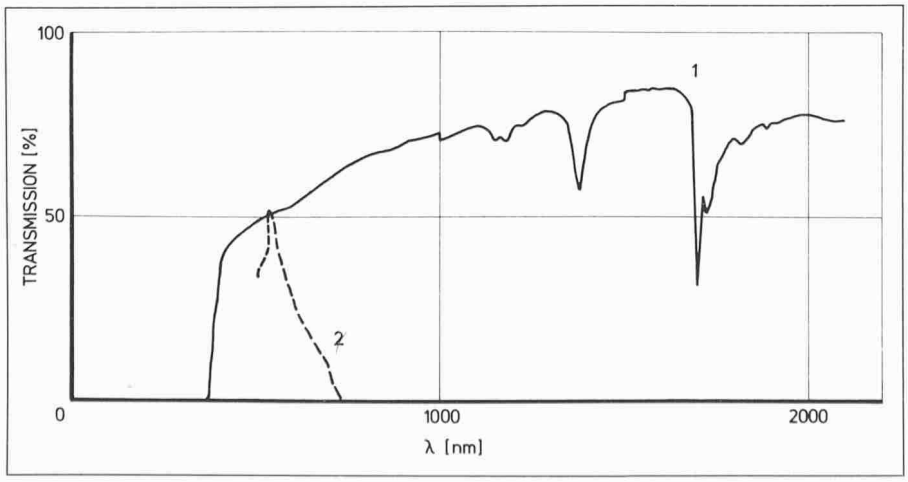


Bild 7. Transmissionsspektren
Kurve 1: eine PVC-Wand = 1 mm dick Kurve 2: Wasserschicht von 4 m

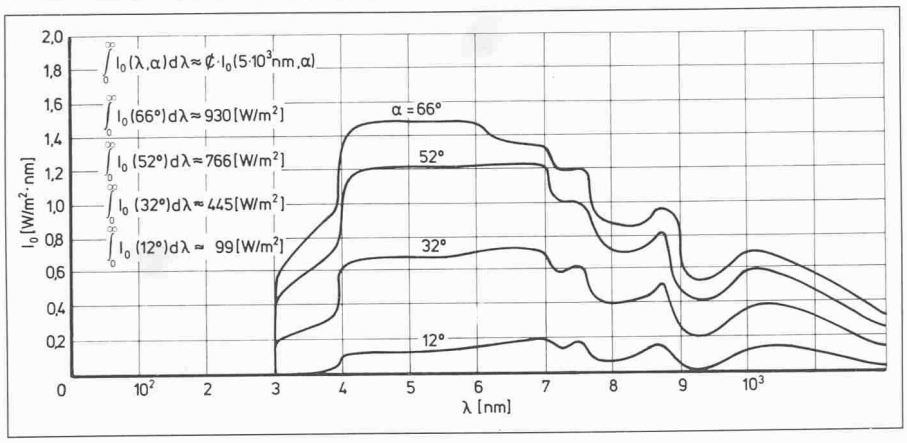


Bild 8. Spektrale Verteilung der vom Wasser absorbierten Strahlung

Die Integration der pro Fläche im Schwimmbad absorbierten Strahlungsintensität über die Zeit t entsprechend dem Sonnenstand (Einfallswinkel α) für einzelne Tage erhält man leicht mit der Vereinfachung

$$\int_{1\,Tag} \int_{\lambda=0}^{\infty} I_A(\alpha(t),\lambda)\,d\lambda\,dt$$

(13)

$$\simeq \sum_{t=5}^{20h} \left(\int_{\lambda=0}^{\infty} I_A(\alpha(t),\lambda)\,d\lambda + \int_{\lambda}^{\infty} I_A(\alpha(t+1),\lambda)\,d\lambda \right) \cdot \frac{3600}{2}$$

Daraus ergibt sich folgende Sonnenstrahlungsenergieaufnahme E des Schwimmbades pro m² Abdeckfläche und Tag bzw. der Einstrahlung zuzurechnende dauernde mittlere (auf 24 h bezogen) Heizleistung Q_J^* für 36 m² in kW (Tabelle 1).

Tabelle 1. Sonnenstrahlungsenergieaufnahme

Tag	E $[\frac{MJ}{m^2}]$	Q^*_{Str} $[\frac{kW}{36\,m^2}]$
21. Juni	12	5
1. Juni und 15. Juli	12	5
15. Mai und 1. Aug.	11	4,6
1. Mai und 15. Aug.	9,4	3,9
15. April und 1. Sept.	7,4	3,1

Vergleich der Rechenwerte mit Messungen

Sinnvoll durchgeführte Messungen geben sicher die gleichen Ergebnisse wie eine korrekte theoretische Berechnung, dienen hier also zur Kontrolle, ob die für die Berechnung gemachten Voraussetzungen nicht allzu vereinfachend waren.

Bei der Messung dienten Kupfer-Konstantan Thermoelemente als Temperaturfühler, für die Messeinrichtung verwendeten wir abgeschirmte Kabel, Nullpunktthermostat, Kompensationsschreiber. Die Wassertemperatur wurde anfänglich an zwei Orten im Becken auf je drei verschiedenen Niveaus gemessen. Später – als der Einfluss der Wasserumwälzung bekannt war – nur noch mit einem Messfühler ca. 10 cm unter der Wasseroberfläche.

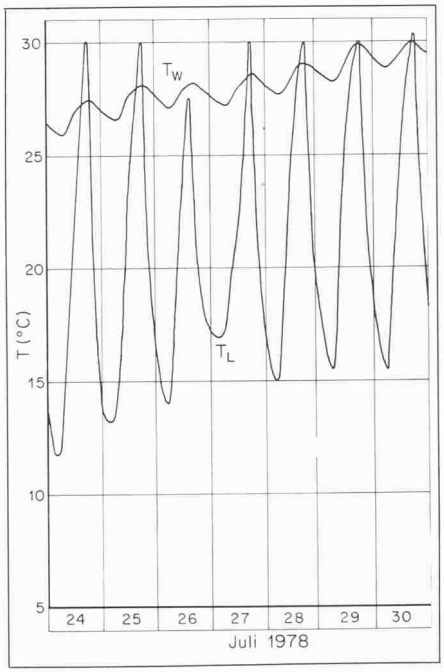


Bild 9. Wasser- und Lufttemperaturen T_W und T_L in der Zeit vom 24.–30.7.1978

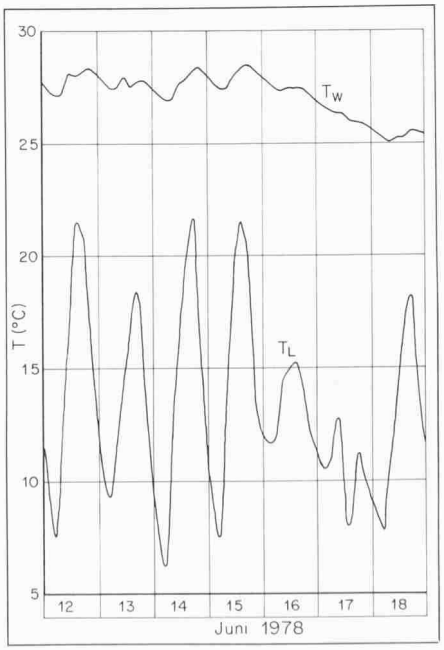


Bild 10. Wasser- und Lufttemperaturen T_W und T_L in der Zeit vom 12.–18.6.1978

Gleichzeitig wurde die Aussentemperatur registriert und zwar mit wenigen Fühlern in der freien Umgebung, so dass damit auch jeweils die Besonnungszeit (nicht aber die Intensität) mitregistriert wurde.

Die Bilder 9 und 10 zeigen typische Temperatur-Kurven, die im nasskalten Sommer 1978 aufgenommen wurden.

In der sonnigen Juli-Woche (24.7.–30.7.) Bild 9) nahm die Wassertemperatur von 27,4 auf 30,1° C, d. h. um 2,7 K zu. Das entspricht einer mittleren Nettoheizleistung von 1,1 kW. Die Temperatur der Umgebung war dabei – abgesehen von einigen Tagesspitzen mit bis zu 30° C – im Mittel etwa 10 K tiefer als die Wassertemperatur.

Recht schön wird die Wirksamkeit dieser durchlässigen Abdeckung in einer Kälteperiode Mitte Juni 1978 gezeigt. In dieser Zeit waren die Morgentemperaturen nie über 12° C und sanken sogar bis 6° C ab (Bild 10). Die Wassertemperatur sank dabei von 27,7° C auf 25,4° C ab, entsprechend einem mittleren Verlust von 0,8 kW.

Mit Hilfe der Messwerte (gesamte Aufheiz- bzw. Abkühlrate) ist es nun unter Zuhilfenahme der gut berechenbaren Wärmeströme durch Leitung bzw. Einstrahlung möglich, die nur schätzbaren Ströme durch Leitung und Verdunstung von der Oberfläche sowie Abstrahlung genauer zu ermitteln.

Bei ganz klarer Atmosphäre ist die während 12 Stunden gemessene Aufheizung im Mittel 1,41 K entsprechend einem gesamten Wärmestrom von 295 MJ.

Durch Strahlung wurde eingebracht 11 MJ/m², d. h. insgesamt 396 MJ. Damit ergibt sich ein Verlust von 100 MJ durch Leitung. Der Anteil davon, der bei einem ΔT von 20 K ins Erdreich geht, beträgt 1,23 kW oder in 12 h 53 MJ.

Als Leistungsanteil durch die Badabdeckung ergibt sich somit 47 MJ oder 1,1 kW, was recht gut mit dem für eine mittlere Temperaturdifferenz von 10 K berechneten Wert übereinstimmt.

Die Temperaturabsenkung in klaren Nächten beträgt im Mittel 0,84 K entsprechend einer Wärmemenge von 176 MJ.

Ans Erdreich gehen in 12 Stunden 53 MJ und es bleiben für die nächtlichen Verluste durch die Abdeckung noch 123 MJ, was in etwa hälftig auf Abstrahlung sowie Leitung und Verdunstung aufzuteilen ist.

Damit wäre der Verlust durch Abstrahlung etwa ein Drittel des Betrages, der sich für die Abstrahlleistung (1,435 kW) eines schwarzen Strahles von 10° C gegenüber einer schwarzen Atmosphäre mit im Mittel −40° C ergäbe. Dies zeigt wiederum die Wirksamkeit der Doppelabdeckung.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *Chr. Trepp*, Institut für Verfahrens- und Kältetechnik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.